جغرافیا و مخاطرات محیطی، شمارۀ سی و پنجم، پاییز ۱۳۹۹

صص ۹۷- ۷۹

DOI: https://dx.doi.org/10.22067/geoeh.2020.67015.0

مقاله پژوهشی

پهنه‌بندی آسیب‌پذیری لرزه‌ای با استفاده از مدل WASPAS و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعۀ موردی: شهر ارومیه)

سارا بهشتی فر[1]- استادیار گروه نقشه برداری، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز،تبریز،ایران

ستّار صحرایی- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ژئودزی دانشگاه تبریز،تبریز،ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۵/۲۵ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۷/۳۰ تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۰/۷

چکیده

زلزله از جمله مخاطراتی است که به دلیل ماهیت غیرمنتظره‌اش، خسارت‌های جانی و مالی فراوانی بر جای می‌گذارد. هر چند برای پیشگیری از وقوع زلزله راهی وجود ندارد ولی می‌توان با راهکارهایی همچون پهنه‌بندی و شناسایی مناطق آسیب‌پذیر، خسارت‌های ناشی از آن را تا حدّی کاهش داد. هدف این پژوهش تهیه نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری شهر ارومیه در برابر زلزله می‌باشد. برای این منظور، معیارهای مؤثر شناسایی و اهمیت نسبی آنها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی، مشخص شدند. پهنه‌بندی با استفاده از روش تلفیقی جمع و ضرب وزنی (WASPAS)، به‌عنوان یکی از روش‌های جدید تصمیم‌گیری چندمعیاره، در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام گردید. کل شهر ارومیه از نظر آسیب‌پذیری در برابر زلزله به پنج کلاس کلی آسیب‌پذیری بسیار بالا، آسیب‌پذیری بالا، آسیب‌پذیری متوسط، آسیب‌پذیری پایین و آسیب‌پذیری بسیار پایین تقسیم گردید. مناطق با آسیب‌پذیری بسیار بالا، حدود ۲۱ درصد از کل منطقه را پوشش می‌دهند. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از روش WASPAS با روش متداول جمع وزنی(WS) نشان می‌دهد که در روشWASPAS، مناطق بیشتری به‌عنوان مناطق با آسیب‌پذیری بسیار بالا شناسایی شده‌اند.

کلیدواژه‌ها: زلزله، وزن‌دهی، پهنه‌بندی، WASPAS، سیستم اطلاعات جغرافیایی.

---

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۹۰۱۳۰۰٤۱۰ Email: Sara_Beheshtifar@ yahoo.com

۱. مقدمه

برخلافِ پیشرفت‌های شگرف در تکنولوژی و دست‌یابی به برخی از ناممکن‌های قرون گذشته، هنوز انسان در برابرِ حوادث غیرمترقبهٔ طبیعی همچون زلزله و سیل درمانده است و گاه و بی‌گاه در معرض تلفات و خسارت‌های جانی و مالی بسیاری قرار می‌گیرد. کشور ایران نیز به دلیل موقعیت جغرافیایی و قرار گرفتن بر روی کمربند جهانی زلزله، در طول تاریخ همواره شاهد زمین‌لرزه‌های بزرگ و خسارتباری بوده است (طبیبیان و مظفری، ۱۳۹۷). نقشه پهنه‌بندی خطر نسبی زمین‌لرزه در ایران حاکی از آن است که بیشتر نقاط شهری و غیر شهری کشور در نواحی باخطر نسبی زیاد قرار گرفته‌اند(مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۷۸). قابلِ‌پیش‌بینی نبودن زمان و مکان وقوع زلزله از یک سو و ساخت‌وسازهای غیراصولی و بی‌توجّهی به میزان خطر در یک منطقه از سوی دیگر، موجب تشدید فجایع می‌گردد. اگرچه نمی‌توان از وقوع زلزله پیشگیری کرد ولی با راهکارهایی همچون پهنه‌بندی و شناسایی مناطق آسیب‌پذیر، می‌توان خسارت‌های ناشی از آن را تا حدی کاهش داد. در روش‌های مذکور، چارچوبی برای بررسی احتمال وقوع خطر زلزله در مکان‌های مختلف با توجّه به عوامل مؤثر ارائه می‌گردد. درتعیین میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای، به طور معمول جنبه‌های فیزیکی، زیست محیطی و اقتصادی – اجتماعی مد نظر قرار می‌گیرند (برات[1] و همکاران، ۲۰۱۰). شناخت محدود ه‌های مقاوم و آسیب‌پذیر در سطح شهر، از یک سو می‌تواند نقش مهمی در برنامه‌ریزی برای کاهش خسارات احتمالی داشته باشد و از سوی دیگر می‌تواند به تخصیص بهینه اعتبارات مقاوم‌سازی کمک نماید.

با توجّه به وجود عوامل متعدد در پهنه‌بندی آسیب‌پذیری ناشی از زلزله و ماهیت مکانی اکثرِ عوامل مرتبط، تاکنون در مطالعات متعددی از تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره(MCDM[2]) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS[3]) برای این منظور استفاده شده که در ادامه به برخی از آنها اشاره شده است: ارزیابی آسیب‌پذیری بافت‌های مسکونی در منطقه ٦ تهران با روش تحلیل سلسله مراتبی(AHP[4]) (طبیبیان و مظفری، ۱۳۹۷)، ارزیابی آسیب‌پذیری بافت تاریخی شهرها با استفاده از روش AHP در شهر یزد (فلاح علی آبادی و همکاران، ۱۳۹۲)، ارزیابی و رتبه‌بندی آسیب‌پذیری اجتماعی شهرها در برابر زلزله در شهر یزد (ملکی و همکاران، ۱۳۹۳)، ارزیابی آسیب‌پذیری اجتماعی شهرها در برابر زلزله در خرمدره با روش AHP (احدنژاد و همکاران، ۱۳۹۰)، پهنه‌بندی آسیب‌پذیری زلزله در شهر تهران با منطق فازی (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۳)، ارزیابی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری لرزه‌ای بافت فرسوده مرکزی شهر سنندج با ترکیبی از منطق فازی و تحلیل سلسله مراتبی (فلاحی و چاره جو، ۱۳۹۸)، ارزیابی میزان آسیب‌پذیری بافت‌های شهری باروش ANP در شهر سمیرم (علوی و همکاران، ۱۳۹۵)، ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌های شهری در برابر شدت‌های مختلف زلزله در منطقه ۹ شهرداری تهران (نظم فر و علوی، ۱۳۹۷)، تحلیل ناپایداری بافت‌های

1 Barbat
2 Multiple-criteria decision-making
3 Geographic Information Systems
4 Analytic Hierarchy Process

شهری و پهنه‌بندی میزان آسیب‌پذیری شهر سنندج در برابر زلزله (حبیبی، جوانمردی، ۱۳۹۲)، ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها و تلفات انسانی در تبریز(کریم‌زاده[1] و همکاران، ۲۰۱٤)، ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در برابر زلزله در کشـور هندوستان (نینگ‌توجام[2] و ناندا[3]، ۲۰۱۸)، ارزیابی آسیب‌پذیری در برابر زلزله با استفاده از نظریه بازی در شهر تهران(مرادی[4] و همکاران، ۲۰۱۷)، ارزیابی آسیب‌پذیری در برابر زلزله در شهر تبریز با روشی تلفیقی (علیزاده[5] و همکاران، ۲۰۱۸) و همچنین تجزیه و تحلیل خطر زلزله در شهر استانبول کشور ترکیه (نیمبیلی[6] و همکاران، ۲۰۱۸). علاوه بر موارد مذکور، پژوهش‌های دیگری نیز در این خصوص صورت گرفته که در ادامه برخی از آنها بیان شده‌اند.

حاتمی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۳) به‌منظور تحلیل میزان آسـیب‌پذیری مسکن شهری منطقه ٦ تهران در مواقع بروز زلزله، از روش AHP جهت وزن‌دهی به معیارها و از مدل SAW[7] برای تلفیق لایه‌های مؤثر در آسیب‌پذیری مسکن استفاده کردند. معیارهای سنجش آسیب‌پذیری مسکن در تحقیق مذکور شامل میزان جمعیت، فاصله از فضای سبز، فاصله از کاربری صنعتی، فاصله از جایگاه سوخت، فاصله از پست برق و گاز، فاصله از گسل، دسترسی به جاده‌های ارتباطی، دسترسی به ایستگاه آتش‌نشانی و اندازه قطعه واحد مسکونی بوده‌اند.

قنبری و زلفی (۱۳۹۳) جهت ارزیابی آسـیب‌پذیری شـهر کاشـمر در برابر زلزله، مصالح ساختمانی، کیفیت بنا، قدمت بنا، تعداد طبقات، نما، سـازگاری کاربری‌ها، دسترسی، فاصله از گسل، تراکم ساختمانی، جمعیت و موقعیت مراکز امداد و نجات را به‌عنوان معیارهای تأثیرگذار در نظر گرفتند. در تحقیق مذکور، وزن‌دهی به معیارها با روش AHP و رتبه‌بندی مناطق از نظر آسیب‌پذیری با روش ویکور[8] انجام شد.

پورموسـوی و همکاران (۱۳۹۳)، جهت بررسـی میزان آسـیب‌پذیری حوزه شـهری ایذه در برابر زمین‌لرزه، از مدل‌های WLC[9] و AHP در محیط GIS اسـتفاده کردند. معیارهای به‌کارگرفته‌شـده در این تحقیق، شامل فاصله از خطوط گسل، طول گسل، ویژگی‌های لرزه‌ای مانندِ بزرگای زمین‌لرزه، وضعیت ساختاری سازندهای زمین‌شناسی و عمق آب‌های زیرزمینی می‌باشند.

ابراهیم‌زاده و همکاران (۱۳۹٤) نیز برای ارزیابی آسیب‌پذیری محله‌های شهر پیرانشهر در برابر زلزله، از مدل‌های تصـمیم‌گیری چندمعیاره اسـتفاده کردند. داده‌های به‌کار رفته شـامل قدمت ابنیه، نوع مصالح، تعداد طبقات، کاربری اراضـی و عرض معابر بودند. وزن معیارها با اسـتفاده از مدل AHP به‌دسـت آمدند. برای تهیه نقشـه آسـیب‌پذیری

1 Karimzadeh
2 Ningthoujam
3 Nanda
4 Moradi
5 Alizadeh
6 Nyimbili
7 Simple Additive Weighting
8 VIKOR: Vlse Kriterijumsk Optimizacija Kompromisno Resenje
9 Weighted Linear Combination

محلات، از مدل‌های تاپسیس[1] و ویکور استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که ۵۳ درصد از محلات پیرانشهر در برابر زلزله آسیب‌پذیر می‌باشند.

نصیری (۱۳۹۵) به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری شهر ارومیه در برابر زلزله نیز فرایند تحلیل سلسله مراتبی را جهت وزن‌دهی به معیارها به‌کار بردند. نقشه‌های آسیب‌پذیری به روش‌های همپوشانی شاخص و منطق فازی در محیط GIS تهیه شدند. نتایج به‌دست آمده حاکی از ارجحیت منطق فازی در تعیین آسیب‌پذیری مناطق می‌باشد.

اردن[2] و همکاران (۲۰۱۲) از میان روش‌های MCDA، از دو روش AHP و تاپسیس در محیط GIS، برای تهیه نقشه‌های خطر زلزله و انجام تجزیه و تحلیل در یکی از مناطق شهر استانبول کشور ترکیه استفاده کردند. در پژوهش مذکور عواملی همچون توپوگرافی، نوع خاک و مکانیسم گسل بمنظور تعیین میزان آسیب‌پذیری در برابر زمین‌لرزه مورد توجه قرار گرفتند. مقایسه نقشه‌های خطر تهیه شده توسط دو مدل AHP و تاپسیس، همبستگی و سازگاری بالایی را بین آنها نشان داد.

ال- دوگوم[3] و همکاران (۲۰۱۸) از روش‌های تجزیه و تحلیل الگوهای مکانی در محیط GIS برای بررسی خطر وقوع زلزله در سراسر صفحه عربستان و تأثیر آنها در امارات متحده عربی (امارات) استفاده کردند. سپس نقشه حساسیت لرزه‌ای امارات با توجه به عواملی نظیر شیب، نوع خاک و زمین شناسی و طول خط گسل تهیه شد و منطقه مورد مطالعه از لحاظ حساسیت در برابر زلزله، به پنج کلاس طبقه‌بندی گردید. طبق نتایج به‌دست آمده شهر فوجیره در منطقه آسیب‌پذیری "بسیار بالا"، شهرهای شارجه و دبی در مناطق با آسیب‌پذیری "بالا تا متوسط" و شهر ابوظبی در منطقه "کم خطر" لرزه‌ای قرار گرفته‌اند.

جنا[4]و همکاران (۲۰۲۰) نیز برای ارزیابی میزان آسیب‌پذیری ناشی از زلزله در شهر بانداآچه[5] در کشور اندونزی، از روش تصمیم‌گیری چند معیاره و GIS استفاده کردند. در تحقیق مذکور، عوامل مختلف اجتماعی، ساختاری و ژئوتکنیکی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که بخش مرکزی شهر در منطقه آسیب‌پذیری بسیار زیاد قرار گرفته است.

یاریان[6]و همکاران (۲۰۲۰) از سیستم‌های مختلف پشتیبان تصمیم‌گیری برای بررسی آسیب پذیری لرزه‌ای شهر سنندج استفاده کردند. عوامل مؤثر بر آسیب‌پذیری لرزه‌ای در سه بعد مختلف اجتماعی، محیطی و کالبدی شناسایی شدند. برای ایجاد مجموعه داده‌های آموزشی، روش‌های مختلفی همچون روش‌های تجزیه و تحلیل چندمعیاره فازی

---

1 TOPSIS: Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
2 Erden
3 Al-Dogom
4 Jena
5 Banda Aceh
6 Yariyan

مورد استفاده قرار گرفتند. نقشه‌های آسیب‌پذیری لرزه‌ای حاصل از مدل‌های مختلف، با استفاده از مساحت زیر منحنی و نسبت فرکانس عتبار سنجی شدند.

از طرفی در سال‌های اخیر در مطالعات مختلفی جهت انجام تصمیم‌گیری چند معیاره از روش WASPAS[1] استفاده شده که در ادامه به تعدادی از آنها به‌عنوان نمونه اشاره شده است.

حسینی خواه و ضرابی (۲۰۱۸) برای شناسایی پهنه‌های لرزه‌خیز شهر لیکک واقع در استان کهگیلویه و بویراحمد، از مدل WASPAS استفاده کردند. در مطالعه مذکور، ۱۰ شاخص اصلی در نظر گرفته شده که از جمله آنها می‌توان به فاصله از گسل‌های فعال، شیب و ارتفاع اشاره کرد. از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های تهیه شده توسط سازمان نقشه برداری و سازمان USGS برای تأمین داده‌های مورد نیاز استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که حدود۲۰ درصد شهرک‌ها در منطقه ناامن قرار گرفته‌اند.

فرجی و آروین (۲۰۱۷) برای بررسی تاب‌آوری منطقه‌ای شهرستان‌های استان خوزستان از تحلیل‌های فضایی و مدل WASPAS استفاده کردند. در پژوهش مذکور، ۲۶ شاخص برای بررسی عوامل اقتصادی، اجتماعی، زیرساختی، خدماتی، بهداشتی-درمانی و محیطی در نظر گرفته شده است. وزن‌دهی شاخص‌ها با روش آنتروپی شانون و رتبه‌بندی شهرستان‌ها با WASPAS صورت گرفته است. یافته‌های تحقیق نشان داده که شهرستان‌های اهواز، دزفول و خرمشهر در رتبه‌های اول تا سوم قرار گرفته‌اند.

شهر ارومیه نیز به دلایل مختلف از خطر وقوع زلزله در امان نیست، لیکن مطالعات اندکی در خصوص بررسی میزان آسیب‌پذیری مناطق مختلف این شهر در مقابل زلزله با استفاده از روش‌های مبتنی بر MCDM در محیط GIS صورت گرفته است. لذا در پژوهش حاضر با استفاده از روش WASPAS، که یکی از روش‌های جدید تصمیم‌گیری چندمعیاره محسوب می‌شود، به رتبه‌بندی مناطق مختلف شهری از نظر میزان آسیب‌پذیری در برابر زلزله و همچنین تهیه نقشه پهنه‌بندی در محیط GIS پرداخته شده است.

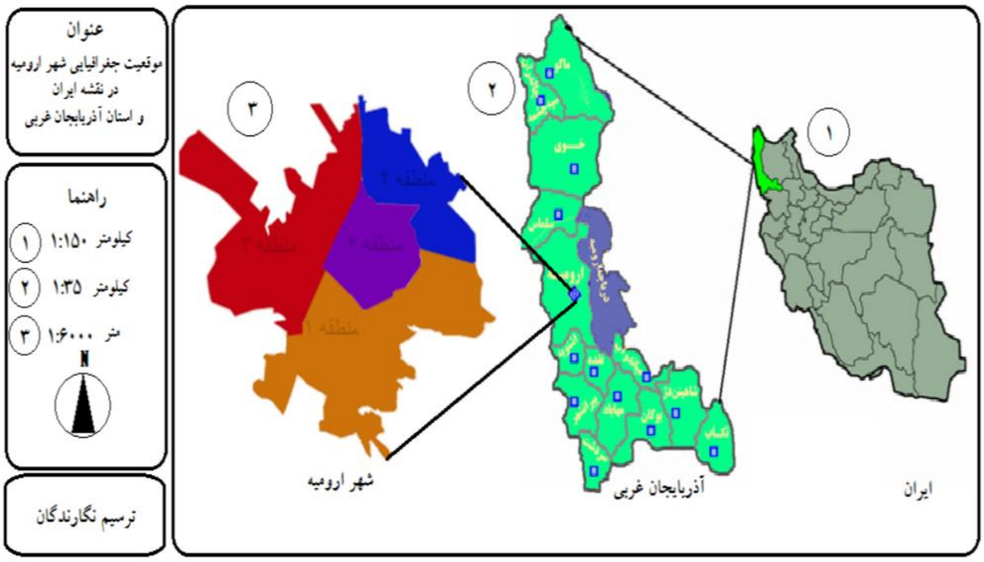
به این ترتیب اهداف این پژوهش عبارتنداز: شناخت معیارهای مؤثردر آسیب‌پذیری شهرارومیه در برابر زلزله؛ تعیین وزن و اهمیت نسبی هر یک از معیارهای مؤثر در آسیب‌پذیری؛ تعیین وضعیت مناطق مختلف شهر با توجّه به هر معیار؛ تهیه نقشه پهنه‌بندی با استفاده از GIS و WASPAS.

1 Weighted Aggregated Sum Product Assessment

۲. مواد و روش‌ها

۲. ۱. منطقه مورد مطالعه

شهر ارومیه، مرکز شهرستان ارومیه و مرکز استان آذربایجان غربی است که در فاصله ۱۸کیلومتری غربِ دریاچه ارومیه، درونِ جلگه‌ای به طولِ ۷۰ کیلومتر و عرضِ ۳۰ کیلومتر قرار گرفته است. موقعیت جغرافیایی این شهر بین ٤٤ درجه و ۵ دقیقه تا ٤۵ درجـــه و ۲٤ دقیقـــه طـــول شـــرقی و ۳۷ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۰ دقیقه عرض شمالی، در شمال غرب ایران می‌باشد (شکل ۱). شهرستان ارومیه تقریباً در مرکز فلاتی قرار دارد که پهنه‌ای به ارتفاع ۱۳۰۰ تا ۳۰۰۰ متر از سـطح دریا و شـامل دریاچه ارومیه اسـت. این پهنه، منطقه‌ای کوهستانی است که به موازات حرکت از طرف غرب به طرف شـرق از ارتفاع آن کاسـته می‌شـود. در تشکیلات رسوبی و درونی زمین در منطقهٔ ارومیه گســستگی‌های زیادی وجود دارد، که گسترش آنها در نواحی کوهستانی غربی و پهنه میانی این منطقه زیاد است (نصیری، ۱۳۹۵).



شکل ۱- موقعیت شهرستان ارومیه (ترسیم: نگارندگان)

۲. ۲. روش تحقیق

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش، توصیفی‌تحلیلی است. چنانکه پیشتر اشاره شد، در این پژوهش، جهت رتبه‌بندی مناطق مختلف شـــهر ارومیه از نظر آســیب‌پذیری در برابر زلزله، از روش WASPAS و به‌منظور وزن‌دهی به معیارها از روش معروف AHP اسـتفاده شـده است. در انتها نتایج به‌دست آمده با نتایج روش جمع وزنی مقایسه شده‌اند که در ادامه به بیان این روش‌ها پرداخته شده است.

روش WASPAS توسط زاوادسکاس[1] در سال ۲۰۱۲ پیشنهاد گردید(کاراباش‌اویچ[2]، ۲۰۱۶). این روش، یکی از روش‌های نسبتاً جدید تصمیم‌گیری چند معیاره با دقت بسیار بالا است که در واقع ترکیبی از دو روش مدل جمع وزنی و مدل ضرب وزنی (WPS[3]) می‌باشد. میزان دقت روش WASPAS نسبت به هر یک از دو روش مذکور بیشتر است (زاوادسکاس، ۲۰۱۲).

مراحل محاسبات روش مذکور به شرح زیر است:

- تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری با توجه به وضع موجود معیارها و گزینه‌ها.
- استانداردسازی و بی‌مقیاس کردن ماتریس تصمیم‌گیری.
- محاسبهٔ وزن هر یک از معیارها با یکی از روش‌های وزن‌دهی نظیر آنتروپی شانون، AHP و یا ANP[4]
- برآورد واریانس مقادیر معیارهای استاندارد شده.
- محاسبه واریانس اهمیت نسبی گزینه‌ها و تعیین مقادیر بردار ویژه.
- انجام رتبه‌بندی نهایی.

در روشWASPAS مانند سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، حل مسأله با ایجاد ماتریس تصمیم‌گیری شروع می‌شود:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$ ماتریس تصمیم‌گیری

در ماتریس تصمیم‌گیری فوق، m نشان‌دهندهٔ تعداد گزینه‌ها و n نشان‌دهندهٔ تعداد معیارهاست. پس از تشکیل این ماتریس، معیارهای مثبت و منفی در آن به ترتیب با استفاده از روابط (۱) و (۲)، نرمال‌سازی می‌شوند. به این مرحله، بی‌مقیاس‌سازی می‌گویند که دلیل ضرورت انجام آن، متفاوت بودن جنس و واحد معیارها می‌باشد.

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{max_i x_{ij}}$$ رابطه (۱)

$$\bar{x}_{ij} = \frac{min_i x_{ij}}{x_{ij}}$$ رابطه (۲)

که در این روابط $\bar{x}_{ij}$ نرمال‌سازی شده x_{ij} و i و j به ترتیب اندکس گزینه‌ها و معیارها می‌باشند. در ادامه باید وزن معیارها با یکی از روش‌های وزن‌دهی به‌دست آیند (w_j). سپس مقادیر $Q_i^{(1)}$ و $Q_i^{(2)}$ که به ترتیب مربوط به جمع و ضرب وزنی می‌باشند، با استفاده از روابط (۳) و (٤) به‌دست می‌آیند.

$$Q_i^{(1)} = y_{ij\,SUM} = \sum_{j=1}^{n} \bar{x}_{ij}\, w_j \quad i = 1،2، \dots ،m \quad j = 1،2، \dots ،n$$ رابطه (۳)

$$Q_i^{(2)} = y_{ij\,mult} = \prod_{j=1}^{n} (\bar{x}_{ij})^{w_j}$$ رابطه (٤)

1 Zavadskas
2 Karabašević
3 Weighted Product Model
4 Analytic Network Process

رابطه نهایی براساس فرمول زاوادسکاس (رابطه ۵) محاسبه می‌شود:

$$Q_i = 0.5Q_i^{(1)} + 0.5Q_i^{(2)}$$ رابطه (۵)

برای افزایش دقت در رتبه‌بندی و اثر بخشی فرایند تصمیم‌گیری در روش WASPAS از رابطه (۷) استفاده می‌گردد.

$$Q_i = \lambda Q_i^{(1)} + (1-\lambda)Q_i^{(2)} = \lambda \sum_{j=1}^{n} \bar{x}_{ij}\, w_j + (1-\lambda) \prod_{j=1}^{n} (\bar{x}_{ij})^{w_j}$$ رابطه (٦)

$$(\lambda = 0.\,0.1.\,\ldots.1).$$

$$Q_{\mathrm{i}}^{\lambda} = \lambda i \sum_{j=1}^{n} y_{ijsum} + (1-\lambda i) \prod_{j=1}^{n} y_{ijmult}$$ رابطه (۷)

$$\lambda i = \frac{\sigma^2(Q_i^{(2)})}{\sigma^2\left(Q_i^{(1)}\right)+\sigma^2\left(Q_i^{(2)}\right)}$$ رابطه (۸)

$$\sigma^2\left(Q_i^{(2)}\right) = \sum_{j=1}^{n} \left(\frac{((\prod_{j=1}^{n}\overline{(x}_{ij})^{w_j} w_j)}{\overline{(x_{ij})}^{w_j}\overline{(x_{ij})}^{1-w_j}}\right)^2 \sigma^2\overline{(x}_{ij})$$ رابطه (۹)

$$\sigma^2\left(Q_i^{(1)}\right) = \sum_{j=1}^{n} w_j^2\ \ \sigma^2(\bar{x}_{ij})$$ رابطه (۱۰)

$$\sigma^2\overline{(x}_{ij}) = (0.05\bar{x}_{ij})^2$$ رابطه (۱۱)

در نهایت، گزینه‌ها می‌توانند بر مبنای ارزش Q رتبه‌بندی شوند. مقدار بهینهٔ λ براساس معادلات بالا به‌دست می‌آید. مقدار λ سهم معادله جمع وزنی و معادله ضرب وزنی در معادله نهایی را مشخص می‌کند (یزدانی[1] و همکاران، ۲۰۱٦).

چنانکه ذکر شد، در این پژوهش، از روش معروف و متداول AHP جهت وزن‌دهی به معیارها استفاده شد. در این روش، مقایسه زوجی بین معیارها انجام می‌شود که برای این منظور، پرسش‌نامه‌های مناسبی تهیه و بین ۱۵ نفر از کارشناسان و مهندسان این حوزه در شهرداری، اداره راه و شهرسازی، بنیاد مسکن و مدیریت بحران شهر ارومیه توزیع گردید. بعد از تحلیل پرسشنامه‌ها و به‌دست‌آوردن مقادیر مقایسه‌های زوجی بین معیارها، وزن معیارها با روش بردار ویژه محاسبه شدند.

برای بررسی بیشتر، نتایج حاصل با نتایج روش جمع وزنی (WS[2]) مقایسه شدند. این روش که متداول‌ترین رویکرد تصمیم‌گیری چندشاخصه می‌باشد، نخستین‌بار توسط پژوهشگران و برنامه‌ریزان اقتصادی در سال ۱۹۵۷ برای انتخاب سیاست‌های سرمایه‌گذاری در بخش تجارت استفاده شد. در روش مذکور، با در نظر گرفتن وزن شاخص‌ها و مقادیر هر یک از گزینه‌ها به ازای هر شاخص، مجموع وزن‌دار برای هر گزینه محاسبه می‌شود و گزینه‌ای که بیشترین مقدار را به خود اختصاص دهد، به‌عنوان بهترین گزینه در نظر گرفته می‌شود (شکور، ۱۳۹٤).

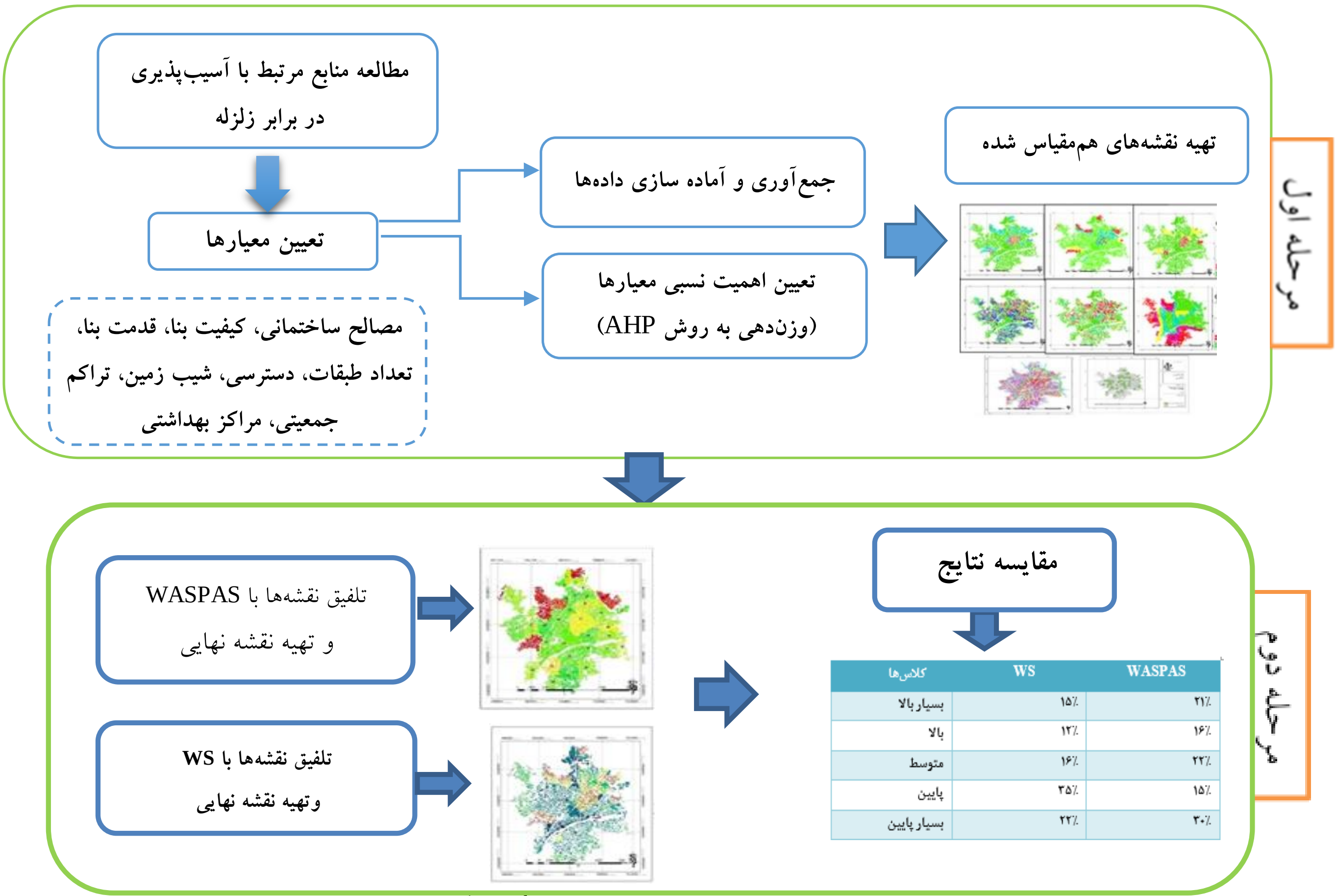
مراحل انجام پژوهش به‌صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است.

---

1 Yazdani
2 Weighted Sum

۲. ۳. عوامل مؤثر و لایه‌های اطلاعاتی مربوط

در این پژوهش، پس از بررسی شرایط منطقه و داده‌های موجود، هشت معیار شاملِ نوع مصالح ساختمانی، کیفیت بناها، قدمت بناها، تعداد طبقات، تراکم جمعیتی، شیب زمین، دسترسی به معابر و نزدیکی به مراکز بهداشتی‌درمانی، به‌عنوان عوامل مؤثر درنظرگرفته شدند. جهت بررسی این عوامل در مدل تصمیم‌گیری، ابتدا لایه‌های اطلاعاتی مربوط شامل نقشه معابر، توپوگرافی، موقعیت مراکز بهداشتی و همچنین نقشه بلوک شهری با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ شهر ارومیه، تهیه شدند. این نقشه‌ها از شهرداری و اداره راه و شهرسازی اخذ شده بودند. سپس تمامی آنها با در نظر گرفتن بیضوی WGS 1984 و سیستم تصویر UTM زون ۳۸ شمالی آماده‌سازی شدند. در ادامه، اطلاعات توصیفی مربوط به مصالح ساختمانی، کیفیت بناها، قدمت بناها، تراکم جمعیتی و تعداد طبقات به لایه بلوک شهری اضافه شدند که این اطلاعات از طرح‌های تفصیلی، طرح جامع، طرح ساماندهی ویژه بافت‌های فرسوده شهر ارومیه و اطلاعات سرشماری‌های عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ به‌دست آمده بودند.



شکل ۲- مراحل انجام تحقیق (ترسیم: نگارندگان)

۳. نتایج پژوهش و بحث

پس از مقایســه زوجی هشت معیار مورد بررسی در آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر ارومیه (جدول ۱)، وزن نسبی هر معیار با روش AHP به دســت آمد که نتایج آنها در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به محاسبات انجام شده، نرخ ناسازگاری ۰/۰۹ می‌باشد که کمتر ۰/۱ و در نتیجه قابل قبول است.

جدول ۱- مقایسه زوجی معیارها (نگارندگان)

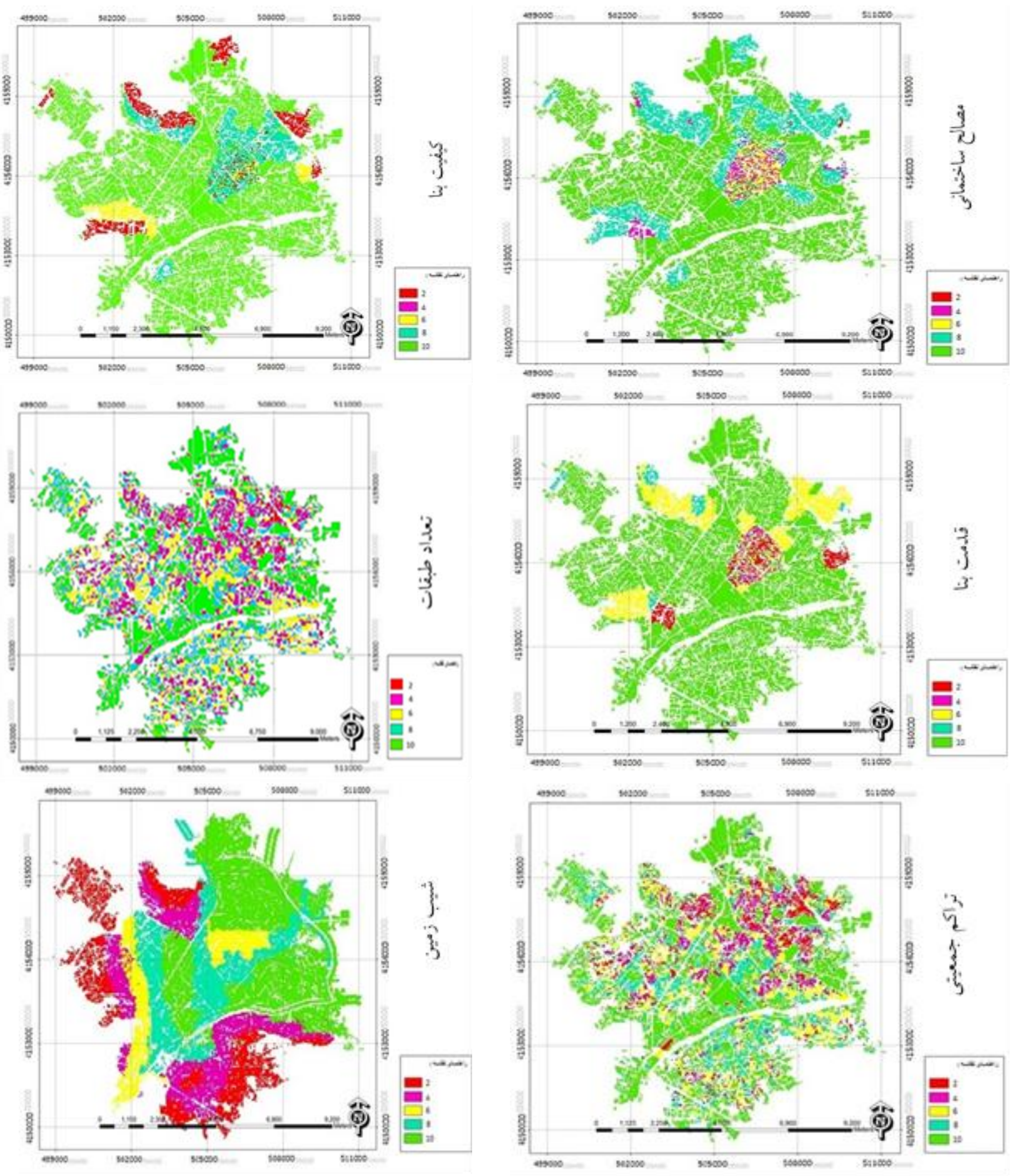
	مصالح ساختمانی	کیفیت بناها	قدمت بناها	دسترسی	شیب زمین	مراکز بهداشتی	تراکم جمعیتی	تعداد طبقات
مصالح ساختمانی	۱	۲	۳	۵	۷	۵	۸	٦
کیفیت بناها	۱/۲	۱	۳	٦	۷	٦	۵	۷
قدمت بناها	۱/۳	۱/۳	۱	۵	٦	٤	٦	۷
دسترسی	۱/۵	۱/٦	۱/۵	۱	٤	۲	٤	۵
شیب زمین	۱/۷	۱/۷	۱/٦	۱/٤	۱	۳	٤	۱
مراکز بهداشتی	۱/۵	۱/٦	۱/٤	۱/۲	۱/۳	۱	۳	۵
تراکم جمعیتی	۱/۸	۱/۵	۱/٦	۱/٤	۱/٤	۱/۳	۱	۳
تعداد طبقات	۱/٦	۱/۷	۱/۷	۱/۵	۱	۱/۵	۱/۳	۱

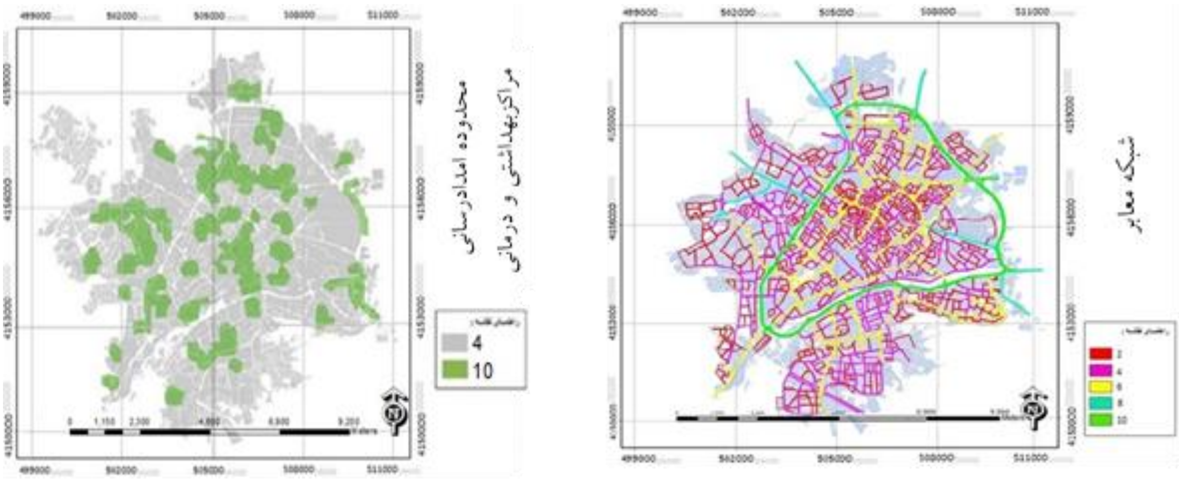
جدول ۲- وزن معیارهای آسیب‌پذیری شهری ارومیه با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) (نگارندگان)

معیار	نوع مصالح ساختمانی	کیفیت بناها	قدمت بناها	تعداد طبقات	تراکم جمعیتی	شیب زمین	دسترسی به معابر	مراکز بهداشتی درمانی
وزن	۰/۲۳٤	۰/۳٤۲	۰/۱۸۷	۰/۰۲۲	۰/۰٤٤	۰/۰۲٤	۰/۰۸۳	۰/۰٦٤

برای هریک از هشت معیار، یک نقشه فاکتور تهیه شده است که مقادیر موجود در آنها، با توجه به نوع معیارها، در بازه عددی ۱ تا ۱۰ قرار گرفته و هم‌مقیاس شــده‌اند. بدترین وضــعیت نشــان‌دهنده عدد ۱ و بهترین وضــعیت نشان‌دهنده عدد ۱۰ است (شکل۳). برای تشکیل ماتریس تصمیم (گزینه‌ها و معیارها) در مدل **WASPAS** لازم است گزینه‌ها مشخص شوند. برای این منظور، براساس نقشه محلات شهر ارومیه، کل منطقه به ۳۹ پهنه تقسیم و هریک از آنها به‌عنوان یک گزینه در نظر گرفته شـد. سـپس مقدار هر معیار برای هر یک از این گزینه‌ها مشخص گردید. در ادامه، با استفاده از روابط ذکر شده برای مدل، محاسبات لازم در محیط نرم‌افزار متلب[1] انجام گردید که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

1 MATLAB


مصالح ساختمانی
کیفیت بنا
قدمت بنا
تعداد طبقات
تراکم جمعیتی
شیب زمین



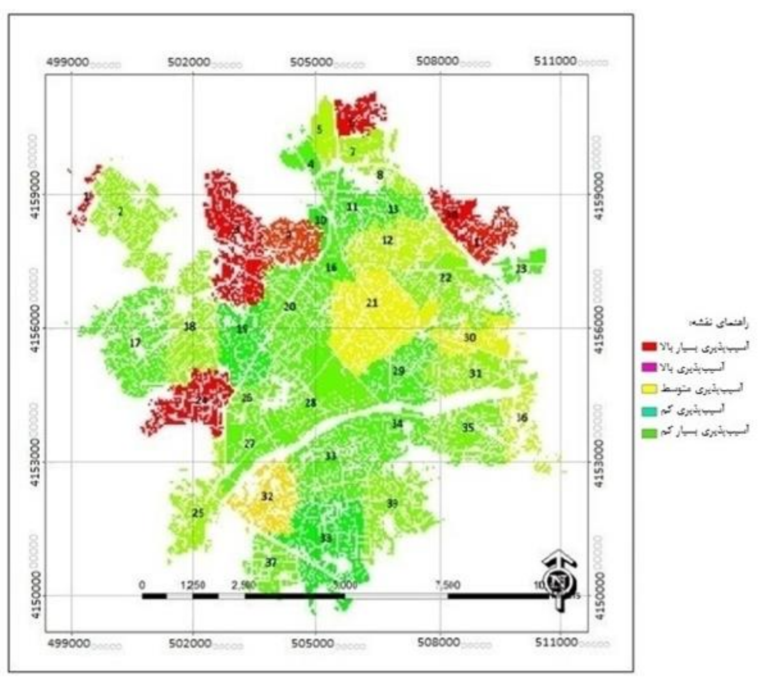
شکل۳- نقشه‌های هم‌مقیاس شده مربوط به معیارها (ترسیم: نگارندگان)

جدول۳-نتایج محاسبات بر اساس مدل WASPAS برای مناطق آسیب‌پذیر(نگارندگان)

گزینه‌ها	WSM	WPM	Q_1	Q_2	λ	Score
گزینه ۱	۰/۳۴۱۳۵	۰/۲۴۰۱۴۹	۰/۰۰۰۴۴۵	۳/۱۸e-۰۵	۰/۲۴۲	۰/۲۶۴
گزینه ۲	۰/۶۸۹۸	۰/۵۴۱۰۴۹	۰/۰۰۰۴۳۹	۰/۰۰۰۱۶۱	۰/۲۷۰	۰/۵۸۱
گزینه ۳	۰/۴۰۷	۰/۲۹۶۰۶۱	۰/۰۰۰۴۳۶	۴/۸۴e-۰۵	۰/۳۰۸	۰/۳۳۰
گزینه ۴	۰/۷۲۶۰۶۷	۰/۵۹۰۵۰۴	۰/۰۰۰۴۴۷	۰/۰۰۰۱۹۲	۰/۳۰۱	۰/۶۳۱
گزینه ۵	۰/۶۷۱۶	۰/۵۲۰۳۳۱	۰/۰۰۰۴۴۱	۰/۰۰۰۱۴۹	۰/۲۵۵	۰/۵۵۹
گزینه ۶	۰/۳۲۷۷۵۶	۰/۲۲۹۲۱۳	۰/۰۰۰۱۹۳	۲/۹e-۰۵	۰/۲۳۰	۰/۲۵۱
گزینه ۷	۰/۶۸۲۶	۰/۵۲۹۶۹۸	۰/۰۰۰۲۵۵	۰/۰۰۰۱۵۵	۰/۲۶۲	۰/۵۶۹
گزینه ۸	۰/۶۸۴۸	۰/۵۳۰۹۲۷	۰/۰۰۰۴۴۶	۰/۰۰۰۱۵۶	۰/۲۶۲	۰/۵۷۱
گزینه ۹	۰/۴۵۵۵۳۳	۰/۳۲۰۱۸۵	۰/۰۰۰۱۰۵	۵/۶۶e-۰۵	۰/۳۲۳	۰/۳۶۳
گزینه ۱۰	۰/۷۵۱۴۶۷	۰/۶۰۸۳۴۱	۰/۰۰۰۴۳۵	۰/۰۰۰۲۰۴	۰/۳۱۰	۰/۶۵۲
گزینه ۱۱	۰/۷۱۹	۰/۶۰۷۰۰۳	۰/۰۰۰۲۳۷	۰/۰۰۰۲۰۳	۰/۳۳	۰/۶۴۴
گزینه ۱۲	۰/۶۰۴۲	۰/۵۰۹۷۵۴	۰/۰۰۰۴۴۱	۰/۰۰۰۱۴۳	۰/۳۶۴	۰/۵۴۴
گزینه ۱۳	۰/۷۳۱	۰/۵۹۳۹۲۵	۰/۰۰۰۴۴۱	۰/۰۰۰۱۹۵	۰/۳۰۵	۰/۶۳۵
گزینه ۱۴	۰/۳۹۶۹۶۷	۰/۲۸۶۰۶۱	۰/۰۰۰۴۴۲	۴/۵۱e-۰۵	۰/۲۷۸	۰/۳۱۶
گزینه ۱۵	۰/۴۴۹۳۳۳	۰/۳۰۸۳۷	۰/۰۰۰۲۲۴	۵/۲۵e-۰۵	۰/۳۰۵	۰/۳۵۱
گزینه ۱۶	۰/۷۲۵۸	۰/۵۸۹۰۱۳	۰/۰۰۰۴۳۶	۰/۰۰۰۱۹۱	۰/۳۰۰	۰/۶۳۰
گزینه ۱۷	۰/۷۱۸۶	۰/۵۹۱۴۰۹	۰/۰۰۰۲۳۸	۰/۰۰۰۱۹۳	۰/۳۰۵	۰/۶۳۰
گزینه ۱۸	۰/۶۸۹۰۲۹	۰/۵۴۳۱۹۳	۰/۰۰۰۴۴۱	۰/۰۰۰۱۶۳	۰/۲۷۱	۰/۵۸۲
گزینه ۱۹	۰/۷۴۵۶۱	۰/۶۱۵۳۴۹	۰/۰۰۰۴۴۱	۰/۰۰۰۲۰۹	۰/۳۱۸	۰/۶۵۶
گزینه ۲۰	۰/۷۱۸۲۶۷	۰/۵۸۳۰۸۸	۰/۰۰۰۴۳۷	۰/۰۰۰۱۸۸	۰/۲۹۸	۰/۶۲۳

گزینه‌ها	WSM	WPM	Q_1	Q_2	λ	Score
گزینه ۲۱	۰/۵۲۶۲۷۱	۰/۴۹۵۵۳۷	۰/۰۰۰۴۳۵	۰/۰۰۰۱۳۵	۰/۴۱۲	۰/۵۰۸
گزینه ۲۲	۰/۶۳۷۶۶۷	۰/۵۵۹۸۳۵	۰/۰۰۰۴۳۸	۰/۰۰۰۱۷۳	۰/۴۰۳	۰/۵۹۱
گزینه ۲۳	۰/۷۲۸	۰/۵۹۱۰۱۴	۰/۰۰۰۴۴۳	۰/۰۰۰۱۹۳	۰/۳۰۱	۰/۶۳۲
گزینه ۲۴	۰/۳۶۷۸۹۵	۰/۲۶۰۲۰۹	۰/۰۰۰۴۳۷	۳/۷۴e-۰۵	۰/۲۶۲	۰/۲۸۸
گزینه ۲۵	۰/۶۸۱۴۲۹	۰/۵۳۲۸۶۹	۰/۰۰۰۴۴۵	۰/۰۰۰۱۵۷	۰/۲۶۴	۰/۵۷۲
گزینه ۲۶	۰/۶۴۶۱۳۳	۰/۵۸۶۹۳۶	۰/۰۰۰۴۳۹	۰/۰۰۰۱۹	۰/۴۴۵	۰/۶۱۳
گزینه ۲۷	۰/۷۱۶۰۶۷	۰/۵۸۱۷۳۸	۰/۰۰۰۴۳۶	۰/۰۰۰۱۸۷	۰/۲۹۷	۰/۶۲۱
گزینه ۲۸	۰/۷۰۹۴۶۷	۰/۵۷۶۵۷۲	۰/۰۰۰۴۴۷	۰/۰۰۰۱۸۳	۰/۲۹۳	۰/۶۱۵
گزینه ۲۹	۰/۷۲۶۵۳۳	۰/۶۰۰۹۴۴	۰/۰۰۰۴۴۱	۰/۰۰۰۱۹۹	۰/۳۱۰	۰/۶۳۹
گزینه ۳۰	۰/۵۶۹۲	۰/۴۸۷۷۷	۰/۰۰۰۱۹۳	۰/۰۰۰۱۳۱	۰/۳۶۹	۰/۵۱۷
گزینه ۳۱	۰/۶۸۴۵۳۳	۰/۵۴۲۴۴۱	۰/۰۰۰۲۵۵	۰/۰۰۰۱۶۲	۰/۲۷۱	۰/۵۱۸
گزینه ۳۲	۰/۵۳۷۸	۰/۴۵۳۵۳	۰/۰۰۰۴۴۶	۰/۰۰۰۱۱۳	۰/۳۲۳	۰/۴۸۰
گزینه ۳۳	۰/۷۲۰۴	۰/۵۹۱۳۷۲	۰/۰۰۰۱۰۵	۰/۰۰۰۱۹۳	۰/۳۰۴	۰/۶۳۰
گزینه ۳۴	۰/۷۱۷	۰/۵۹۵۱۸۹	۰/۰۰۰۴۳۵	۰/۰۰۰۱۹۵	۰/۳۰۷	۰/۶۳۲
گزینه ۳۵	۰/۷۰۳۲۷۶	۰/۵۶۶۵۹۶	۰/۰۰۰۲۳۷	۰/۰۰۰۱۷۷	۰/۲۸۸	۰/۶۰۵
گزینه ۳۶	۰/۶۶۵	۰/۵۰۴۷۰۲	۰/۰۰۰۴۴۱	۰/۰۰۰۱۴۱	۰/۲۴۴	۰/۵۴۳
گزینه ۳۷	۰/۷۱۰۵۳۳	۰/۵۷۶۹۰۱	۰/۰۰۰۴۴۱	۰/۰۰۰۱۸۴	۰/۲۹۵	۰/۶۱۶
گزینه ۳۸	۰/۷۳۶۲۶۷	۰/۶۲۱۸۵۴	۰/۰۰۰۴۴۲	۰/۰۰۰۲۱۳	۰/۳۲۴	۰/۶۵۹
گزینه ۳۹	۰/۶۹۷۶	۰/۵۵۴۸۲۲	۰/۰۰۰۲۲۴	۰/۰۰۰۱۷	۰/۲۸۰	۰/۵۹۴

پس از تعیین میزان خطر در هر پهنه با استفاده از مدل WASPAS، نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری شهر ارومیه در برابر زلزله تهیه و به پنج کلاسِ آسیب‌پذیری بسیار بالا، آسیب‌پذیری بالا، آسیب‌پذیری متوسط، آسیب‌پذیری پایین و آسیب‌پذیری بسیار پایین تقسیم گردید (شکل ٤). بر اساس نقشه به‌دست آمده با مدل WASPAS، ۲۱ درصد از مساحت شهر ارومیه در محدودۀ آسیب‌پذیری بسیار بالا در برابر زلزله قرار دارند. مساحت محدوده‌ها با آسیب‌پذیری بالا، متوسط، پایین و بسیار پایین، به ترتیب برابر ١٦، ٢٢، ١٥ و ٢٦ درصد می‌باشد. اسامی مناطقی که در معرض آسیب جدی قرار دارند، به ترتیب شماره پهنه، در جدول ٤ ارائه شده‌اند.



شکل ٤- نقشه پهنه‌بندی مناطق آسیب‌پذیر با استفاده از روش WASPAS (ترسیم: نگارندگان)

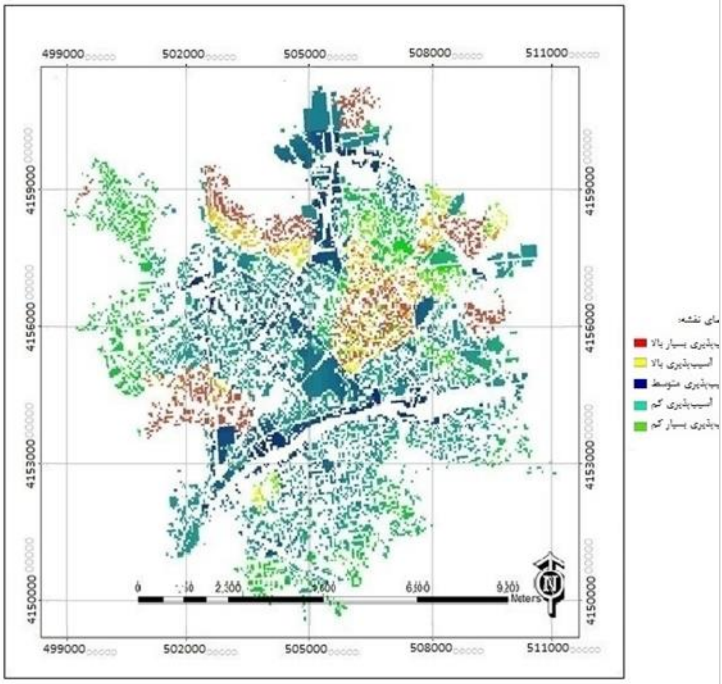
جدول ٤- مناطق در معرض آسیب جدیشهر ارومیه در برابر زلزله(نگارندگان)

شماره پهنه	نام محل	عامل (های) اصلی خطر	مساحت پهنه (کیلومترمربع)
پهنه ۱	استاد شهریار	کیفیت بنا، شیب زمین	۰/٦٥
پهنه ۳	اسلام‌آباد ۱	کیفیت بنا، شیب زمین	٤/۱۹
پهنه ٦	محدوده بزرگراه شهدا	کیفیت بنا	۲/۷٥
پهنه ۹	کشتارگاه	کیفیت بنا، شیب زمین	۱/٦٤
پهنه ١٤	وکیل‌آباد	قدمت بنا	۰/۷۲
پهنه ١٥	اسلام آباد ۲	کیفیت بنا، قدمت بنا	۰/۹٥
پهنه ٢٤	طرزیلو	کیفیت بنا، قدمت بنا	۱/۹٦

نتایج حاکی از آن است که از بین ۳۹ پهنهٔ شهری، ۷ پهنهٔ شهری در ارومیه در معرض خطرپذیری بسیار بالا در هنگام بروز زلزله هستند و معیارهای کیفیت بناها، نوع مصالح ساختمانی و قدمت بناها در مقایسه با سایر عوامل نقش بیشتری در میزان حساسیت پهنه‌ها داشته‌اند.

چنانکه پیشتر اشاره شد، جهت مقایسه، نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری با روش جمع وزنی نیز تهیه شد. در این روش هم از همان نقشه‌های هم‌مقیاس شده قبلی و وزن‌های به‌دست آمده از روش AHP استفاده شد. در این مرحله

نیز نقشه نهایی به پنج کلاس تقسیم شد که طبق آن مناطق با آسیب‌پذیری بسیار بالا حدود ۱۵ درصد و مساحت محدوده‌ها با آسیب‌پذیری بالا، متوسط، پایین و بسیار پایین، به ترتیب برابر ۱۲، ۱٦، ۳۵ و ۲۲ درصد می‌باشند (شکل۵). بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی دو روش نشان می‌دهد که در اکثر مناطق دو روش نتایج مشابهی دارند. با اینحال برخی از محلات مانند بزرگراه شهدا که مربوط به پهنه شماره ٦ می‌باشد، در مدل WASPAS در طبقه آسیب‌پذیری بسیار بالا قرار گرفته در حالیکه در مدل WS به طبقه آسیب‌پذیری بالا تعلق دارد.



شکل ۵- نقشه پهنه‌بندی مناطق آسیب‌پذیر با استفاده از روشWS (ترسیم: نگارندگان)

٤. نتیجه‌گیری

بررسی وضعیت محیط نسبت به وقوع بحران‌های احتمالی و انجام برنامه‌ریزی اصولی پیش از وقوع بحران، می‌تواند نقش مهمی در مدیریت صحیح در هنگام وقوع بحران‌ها داشته باشد. زلزله از جمله سوانحی است که به سبب شرایط خاص جغرافیایی، کشور ما را دائماً مورد تهدید قرار می‌دهد. اغلب مناطق کشورمان در معرض خطر زلزله قرار دارند؛ لکن در داخل شهرها به‌دلیل بالاتر بودن تراکم جمعیتی، میزان آسیب‌پذیری و در نتیجه اثرات فاجعه بر شهروندان، در صورت وقوع زلزله، نیز بیشتر است. از این رو شناخت و تعیین میزان آسیب‌پذیری بافت‌های شهری در برابر زلزله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد.

در این پژوهش به تهیه نقشه حساسیت مناطق مختلف شهر ارومیه در برابر وقوع زلزله و تعیین میزان آسیب‌پذیری هر یک از محلات در برابر زلزله، جهت کاهش میزان خسارات ناشی از این پدیده پرداخته شد. چنین اطلاعاتی می‌تواند هم در خصوص برنامه‌ریزی برای مقاوم‌سازی و هم در مدیریت بحران و اسکان اضطراری در صورت وقوع حادثه مفید واقع شود. به منظورتهیه نقشه پهنه‌بندی، اهمیت نسبی معیارهای مورد بررسی که شامل مصالح ساختمانی، کیفیت بناها، قدمت بناها، دسترسی به معابر، شیبِ زمین، تراکم جمعیتی، تعداد طبقات و نزدیکی به مراکز بهداشتی‌درمانی می‌باشند، با استفاده از روش پرکاربرد AHP شدند و در نهایت نقشه‌های پهنه‌بندی با استفاده از دو مدل WASPAS و WS ایجاد گردیدند و مورد مقایسه قرار گرفتند. طبق نتایج پژوهش صورت گرفته، کیفیت بناها و مصالح ساختمانی در مقایسه با سایر معیارها نقش مهم‌تری در میزان آسیب‌پذیری محلات مختلف شهر ارومیه داشته‌اند.

پس از تهیه نقشه‌های نهایی، کل منطقه مورد مطالعه بر اساس میزان حساسیت به پنج طبقه آسیب‌پذیری بسیار بالا، آسیب‌پذیری بالا، آسیب‌پذیری متوسط، آسیب‌پذیری پایین و آسیب‌پذیری بسیار پایین تقسیم گردید. بررسی نتایج مدلWASPAS نشان که حدود ۲۱ درصد از کل منطقه در طبقه مربوط به آسیب‌پذیری بسیار بالا قرار گرفته‌اند. در حالیکه طبق نتایج مدل WS، طبقه مربوط به آسیب‌پذیری بسیار بالا، حدود ۱۵ درصد از کل منطقه را پوشش می‌دهد. بعبارتی مدل WASPAS محدودهٔ بیشتری را برای این طبقه نسبت به مدل WS شناسایی کرده است.

با مشخص شدن مناطقی که میزان آسیب‌پذیری کمتری در هر دو روش داشته‌اند، می‌توان برنامه‌ریزی‌های مناسبی پیرامون مدیریت بحران انجام داد. به‌عنوان نمونه می‌توان برای پایگاه‌های چند منظوره مدیریت بحران، مراکز اسکان موقت و یا مراکز امدادرسان، مکان‌یابی نمود.

کتابنامه

ابراهیم زاده، عیسی؛ کاشفی، دیمن؛ ١٣٩٤. ارزیابی آسیب‌پذیری محله‌های شهری در برابر زلزله (نمونه موردی: شهر پیرانشهر. نشریه برنامه‌ریزی فضایی. دوره ۵. شماره۱. ۱–۲۵.

احدنژاد، محسن؛ زلفی، علی؛ نوروزی، محمدجواد؛ جلیلی، کریم؛ ۱۳۹۰. ارزیابی آسیب‌پذیری اجتماعی شهرها در برابر زلزله نمونه موردی (شهر خرمدره). فصلنامه جغرافیایی چشم انداز زاگرس. دوره ۳. شماره ۷. ۸۱–۹۸.

پورموسوی، سید موسی؛ شماعی، علی؛ احدنژاد، محسن؛ ۱۳۹۳. ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمانهای شهر با مدل فازی AHP و GIS مطالعه موردی منطقه ۳ شهرداری تهران. فصلنامه علمی و پژوهشی جغرافیا و توسعه. شماره۳٤. ۱۱۷-۱۳۲.

حاتمی نژاد، حسین؛ بذرافکن شهرام؛ ابراهیمی، محمد؛ ۱۳۹۳. تحلیل میزان آسیب‌پذیری مسکن شهری در مواقع بروز مخاطرات محیطی (زلزله) با استفاده تکنیک‌های تلفیقیMCDM و GIS مطالعهٔ موردی: منطقه ٦ شهر تهران. نشریه جغرافیا و محیط پایدار. دوره ٤. شماره ۱۳. ۱-۱۱.

حبیبی، کیومرث؛ جوانمردی، کومار؛ ۱۳۹۲. تحلیل ناپایداری بافت‌های شهری و پهنه بندی میزان آسیب پذیری در برابر زلزله با استفاده از GISوAHP ، نمونه موردی: بخشی از هسته مرکزی شهر سنندج. آرمانشهر. دوره ٦. شماره ۱۱. ۲۹۳-۳۰۵.

حسینی خواه، حسین؛ ضرابی، اصغر.(۱۳۹۸. شناسایی پهنه‌های لرزه خیز شهر لیکک مرکز شهرستان بهمئی در استان کهگیلویه و بویراحمد. نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. تابستان ۱۳۹۸ شماره ۲. ۱٤۷-۱٦٤.

شکور، علی؛ ۱۳۹٤. مطالعه تطبیقی روش‌های چند شاخصه جهت اولویت بندی استقرار مراکز ICT مطالعه موردی بخش فورگ شهرستان داراب. مجله پژوهش و برنامه ریزی روستایی. سال ٤ و شماره ٤. ۲۱۱-۲۲٤.

علوی، سید علی؛ حسینی، سید مصطفی؛ بهرامی، فریبا؛ عاشورلو، مهراب؛ ۱۳۹۵. ارزیابی میزان آسیب پذیری بافتهای شهری با استفاده از ANP وGIS (مطالعه موردی: شهر سمیرم). اطلاعات جغرافیایی. دوره۲۵. شماره ۱۰۰. ۱۲۹-۱٤٦.

طبیبیان، منوچهر؛ مظفری، نگین؛ ۱۳۹۷. ارزیابی آسیب‌پذیری بافت‌های مسکونی در برابر زلزله و راهکارهای کاهش آسیب‌پذیری مطالعه موردی: منطقه شش شهرداری تهران. مطالعات شهری. ۲۷. ۹۳-۱۱۲.

فرجی، امین؛ آروین، محمود؛ آتش افروز، نسرین؛ ۱۳۹۷. بررسی تاب‌آوری منطقه‌ای، شهرستان‌های استان خوزستان با استفاده از تکنیک آنتروپی شانون. نشریه آمایش سرزمین تابستان ۱۳۹۷دوره ۱۰ شماره ۱. ۱-۲۹.

فلاح علی آبادی، سعید؛ گیوه چی، سعید؛ اسکندری، محمد؛ سرسنگی، علیرضا؛ ۱۳۹۲. ارزیابی آسیب پذیری بافت تاریخی شهرها در برابر زلزله با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی و سیستم اطلاعات جغرافیایی. مدیریت بحران. ۲(۱). ۵-۱۳.

فلاحی،فرهاد؛ چاره جو، فرزین؛ ۱۳۹۸. ارزیابی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری لرزه‌ای بافت فرسوده مرکزی شهر سنندج با ملاحظات پدافند غیرعامل. با استفاده از مدل IHWP و .GISمطالعات ساختار و کارکرد شهری. دوره ٦. شماره ۲۱. ۸۵-۱۰۹.

قنبری، ابولفضل؛ زلفی، علی؛ ۱۳۹۳. ارزیابی آسیب‌پذیری شهری در برابر زلزله با تاکید بر مدیریت بحران در شهر کاشمر. نشریه تحلیل فضایی مخاطرات فضایی. سال اول. شماره چهارم. ۵۹-۷٤.

مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن(۱۳۷۸). آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰).

ملکی، سعید؛ مودت، الیاس؛ فیروزی، محمدعلی؛ ۱۳۹۳. ارزیابی و رتبه بندی آسیب پذیری اجتماعی شهرها در برابر زلزله با مدل TOPSIS و GIS (نمونه موردی شهر یزد). برنامه‌ریزی و آمایش فضا. دوره ۱۸. شماره ۳ (پیاپی ۸۵). ۹۹-۱۲٤.

نصـیری، علی؛ ۱۳۹۵. ارزیابی آسیب‌پذیری شهر ارومیه در برابر زلزله با استفاده از روش AHP پارامترهای در محیط GIS. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. سال شانزدهم. شماره ٤٠. ۹۰-۱۱۳.

نظم فر، حسـین؛ علوی، سـعیده؛ ۱۳۹۷. ارزیابی آسیب پذیری ساختمان‌های شهری در برابر شدت‌های مختلف زلزله مطالعه موردی: منطقه ۹ شهرداری تهران. سپهر. دوره ۲۷. شماره ۱۰۸. ١٦٥ – ۱۸۱.

هاشـمی، مهدی؛ آل شیخ، علی اصغر؛ ملک، محمدرضا؛ ۱۳۹۳. پهنه بندی آسیب پذیری زلزله به کمک GIS مطالعه موردی شهر تهران. علوم و تکنولوژی محیط زیست. دوره ١٦. ۳۰۵-۳۱۳.

Al-Dogom D, Schuckma K, Al-Ruzouq R. 2018. Geostatistical Seismic Analysis and Analysis Hazard Assessment, UNITED ARAB EMIRATES. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-3W4: 29–36.

Alizadeh M, Ngah I, Hashim M, Pradhan B, Pour AB. 2018. A Hybrid Analytic Network Process and Artificial Neural Network (ANP-ANN) Model for Urban Earthquake Vulnerability Assessment. Remote Sensing 10: 975.

Barbat A H, Carreño ML, Pujades LG, Lantada N, Cardona OD, Marulanda MC.2010. Seismic vulnerability and risk evaluation methods for urban areas. A review with application to a pilot area, Structure and Infrastructure Engineering 6:1-2: 17-38.

Erden T, Karaman H. 2012. Analysis of earthquake parameters to generate hazard maps by integrating AHP and GIS for K¨uc¨ukc¸ekmece region, Natural Hazards and Earth System Sciences 12: 475–483.

Jena R, Pradhan B, Beydoun G. 2020. Earthquake vulnerability assessment northera sumatra province by using a multi-criteria decision-making model, International Journal of Disaster Risk Reduction (46): 1-28.

Karimzadeh S, Miyajima M, Hassanzadeh R, Amiraslanzadeh R, Kamel B. 2014. A GIS-based seismic hazard, building vulnerability and human loss assessment for the earthquake scenario in Tabriz. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 66: 263-280.

Moradi M, Delavar MR, Moshiri BA. 2017. GIS-based multi-criteria analysis model for earthquake vulnerability assessment using Choquet integral and game theory. Natural Hazards 87: 1377–1398.

Ningthoujam MC, Nanda R P. 2018. A GIS System Integrated with Earthquake Vulnerability Assessment of RC Building. Structures 15: 329-340.

Nyimbili PH, Erden T, Karaman H. 2018. Integration of GIS, AHP and TOPSIS for earthquake hazard analysis. Natural Hazards 92: 1523–1546.

Yariyan P, Avand M, Soltani F, Ghorbanzadeh O, Blaschke T. 2020. Earthquake Vulnerability Mapping Using Different Hybrid Models, Symmetry 12(405): 1-31.

Yazdani M, Zavadskas E, Ignatius J, Doval Abad M. 2016. Sensitivity Analysis in MADM Methods: Application of Material, Inzinerine Ekonomika-Engineering Economics 27(4): 382–391.

Zavadskas E, K, Turskis Z, Antucheviene J, Zakareviciu A. 2012. Optimization of Weighted Aggregated Sum Product Assessment, Electronical Engineering Electtronika IR Electrotechnica 122(6): 1392-1215.